

基于桥面实测的刚构桥冲击系数分析

殷新锋, 谭锋, 吴月成

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 基于三维车辆模型和车—桥耦合分析程序, 利用接触面间的位移协调条件与力相互作用建立车—桥耦合振动方程; 以某大跨度连续刚构桥为工程背景建立桥梁有限元模型, 以桥面不平整作为系统的自激励源, 分别采用有限元软件和 MATLAB 车—桥耦合振动分析程序, 在实测桥面数据下对整体模型在车辆作用下的动力响应和冲击系数进行分析, 并对国内规范和国外几种常用规范计算的冲击系数进行对比分析。

关键词: 桥梁; 桥面不平整度; 车—桥耦合振动; 冲击系数

中图分类号: U464.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0127-06

随着中国经济的发展, 交通密度增大, 高墩桥梁数量增加, 桥梁总长度占线路全长的比例增加, 车辆在桥上的可能性大大增加。车辆在桥上行驶过程中, 为确保车辆的安全和桥梁的正常工作状态, 桥梁在车辆运动作用下的振动微分方程逐渐演变为车桥耦合振动系统。该文采用有限元软件建立桥梁模型, 从模型中提取桥梁的模式、刚度、振型等数据, 并将这些数据加载到基于 MATLAB 研发的车—桥耦合振动分析程序中, 在实测桥面不平整度和三角级数法模拟的桥面不平整度的基础上, 对不同车速下连续刚构桥中跨跨中振动响应及冲击系数进行分析。

1 车桥模型的建立

1.1 三维空间车辆模型

车辆在桥上运动的过程中, 假定车辆模型中的车轴、车体不会产生相对变形, 即认定车轴、车体均为刚体, 这两个刚体之间采用阻尼器及弹簧连接。三维空间车辆模型的正面与侧面见图 1, 该模型仅考虑 7 个自由度, 分别为车体的竖向位移 y_t 、车体的水平转动位移 ϕ_t 、车体的俯仰位移 θ_t 、前轴及后轴的竖向位移 y_a^1 、 y_a^2 和扭转移位 ϕ_a^1 、 ϕ_a^2 。

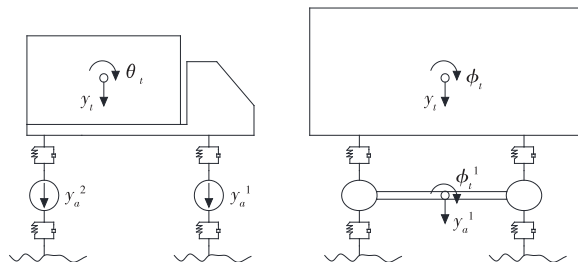


图 1 三维空间车辆模型示意图

结合达郎贝尔原理, 可求得三维车辆模型每一部分的运动平衡方程。车体竖向平衡方程为:

$$m_t \ddot{y}_t + (F_{sy}^1 + F_{sy}^2 + F_{sy}^3 + F_{sy}^4) + (F_{dsy}^1 + F_{dsy}^2 + F_{dsy}^3 + F_{dsy}^4) = m_t g \quad (1)$$

车体横向转动平衡方程为:

$$I_{xt} \ddot{\phi}_t + (s_1/2)(F_{sy}^1 - F_{sy}^2) + (s_2/2)(F_{sy}^3 - F_{sy}^4) + (s_1/2)(F_{dsy}^1 - F_{dsy}^2) + (s_2/2)(F_{dsy}^3 - F_{dsy}^4) = 0 \quad (2)$$

车体纵向转动平衡方程为:

$$I_{xt} \ddot{\phi}_t + l_2(F_{sy}^1 + F_{sy}^2) - l_3(F_{sy}^3 + F_{sy}^4) + l_2(F_{dsy}^1 + F_{dsy}^2) - l_3(F_{dsy}^3 + F_{dsy}^4) = 0 \quad (3)$$

前轴竖向平衡方程为:

$$m_{a1} \ddot{y}_a^1 - (F_{sy}^1 + F_{sy}^2) + (F_{ty}^1 + F_{ty}^2) - (F_{dsy}^1 + F_{dsy}^2) + (F_{dty}^1 + F_{dty}^2) = m_{a1} g \quad (4)$$

前轴翻滚平衡方程为:

$$I_{xa1} \ddot{\phi}_a^1 - (s_1/2)(F_{sy}^1 - F_{sy}^2) + (s_1/2)(F_{ty}^1 - F_{ty}^2) - (s_1/2)(F_{dsy}^1 - F_{dsy}^2) + (s_1/2)(F_{dty}^1 - F_{dty}^2) = 0 \quad (5)$$

后轴竖向平衡方程为:

$$m_{a2} \ddot{y}_a^2 - (F_{sy}^3 + F_{sy}^4) + (F_{ty}^3 + F_{ty}^4) - (F_{dsy}^3 + F_{dsy}^4) + (F_{dty}^3 + F_{dty}^4) = m_{a2} g \quad (6)$$

后轴翻滚平衡方程为:

$$I_{xa2} \ddot{\phi}_a^2 - (s_2/2)(F_{sy}^3 - F_{sy}^4) + (s_2/2)(F_{ty}^3 - F_{ty}^4) - (s_2/2)(F_{dsy}^3 - F_{dsy}^4) + (s_2/2)(F_{dty}^3 - F_{dty}^4) = 0 \quad (7)$$

联立上述方程求解, 可得出三维空间车辆模型运动方程的矩阵形式:

$$[M_v] \{\ddot{y}_v\} + [C_v] \{\dot{y}_v\} +$$

$$[K_v]\{y_v\} = [F_G] + \{F_{v-b}\} \quad (8)$$

式中: $[F_G]$ 、 $\{F_{v-b}\}$ 分别为车体荷载向量和车桥耦合激励作用向量。

1.2 桥梁运动方程

假定桥梁的每个节点都有 n 个自由度, 则可为所有节点建立 n 个运动方程, 联立全部方程, 能推导出整个桥梁的运动方程:

$$[M_b]\{\ddot{u}_b\} + [C_b]\{\dot{u}_b\} + [K_b]\{u_b\} = \{F\} \quad (9)$$

式中: M_b 为桥梁质量矩阵; K_b 为桥梁刚度矩阵; C_b 为桥梁阻尼矩阵; u_b 为桥梁结构各节点的位移列向量; \dot{u}_b 、 \ddot{u}_b 分别为 u_b 关于时间的 1、2 阶导数; F 为桥梁结构外部荷载列向量。

2 桥梁动力响应分析

2.1 结构概况

以某高速公路上一座高墩大跨连续刚构桥为工程背景进行计算分析。该桥主桥计算跨径为 130 m + 248 m + 130 m, 两主墩高度分别为 93.56、111.50 m, 主梁为分幅式单箱单室截面(见图 2)。

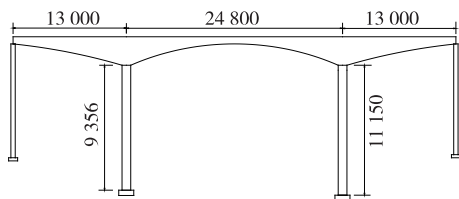


图 2 桥型布置示意图(单位:cm)

2.2 结构自振特性

采用有限元软件建立该桥模型, 根据有限元计算结果, 前 10 阶自振频率、自振周期见表 1, 前 5 阶振型见图 3。

表 1 桥梁结构前 10 阶自振频率

阶次	频率		周期/s
	角频度/ (rad · s ⁻¹)	自振频率/ (cycle · s ⁻¹)	
1	1.363	0.217	4.608
2	2.368	0.377	2.654
3	2.491	0.397	2.522
4	4.344	0.691	1.447
5	4.547	0.724	1.382
6	7.817	1.244	0.804
7	8.032	1.278	0.782
8	9.820	1.563	0.640
9	10.860	1.728	0.579
10	11.347	1.806	0.554

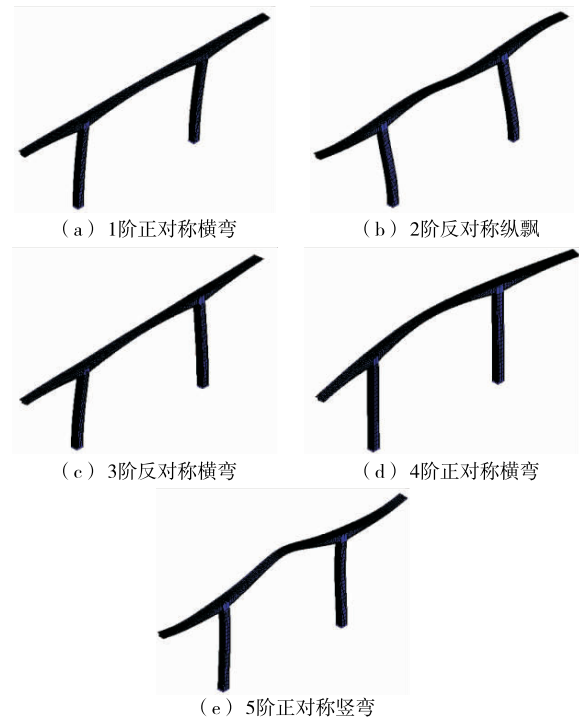


图 3 桥梁结构前 5 阶振型

由表 1 可知: 该桥的固有振动频率随模态阶次的增加而增大, 基频为 1.363 rad/s = 0.217 Hz。

由图 3 可知: 该桥横向刚度较小, 前 10 阶振型中有 6 阶振型为横向弯曲, 且 1 阶振型为横弯, 2 阶为桥墩纵向飘移, 说明桥墩具有一定的柔性。

综上所述, 该桥桥墩较高, 柔性较好, 振型以横弯为主, 纵飘和竖弯次之, 桥墩纵向刚度和主梁横向刚度较弱, 竖向刚度较大, 频率变化较均匀, 动力特性复杂。

2.3 模拟桥面不平度

建立精确有效的桥面不平度模型通常需收集大批实测桥面不平度数据, 并对这些数据进行统计分析, 再通过平稳高斯函数确定不同等级道路的不平度功率谱密度函数, 求得桥面不平度的模拟样本。选取三角级数法模拟桥面不平度样本:

$$r(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{4G_d(n_i)} \Delta n \cos(2\pi n_i x + \varphi_i) \quad (10)$$

式中: $G_d(n) = G_d(n_0)_i \cdot (n/n_0)^{-2}$; $G_d(n_0)$ 为路面不平度系数; 参考空间频率 $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$; $\Delta n = (n_u - n_d)/N$; n_u 、 n_d 分别为有效频率空间的上限和下限, $n_d = 0.02 \text{ m}^{-1}$, $n_u = 2 \text{ m}^{-1}$; x 为桥梁纵向坐标; φ_i 为 $[0, 2\pi]$ 范围内的随机数。

模拟出的不同路面等级的不平整度样本见图

4。GB/T 7031—2005 对路面的分级见表 2。

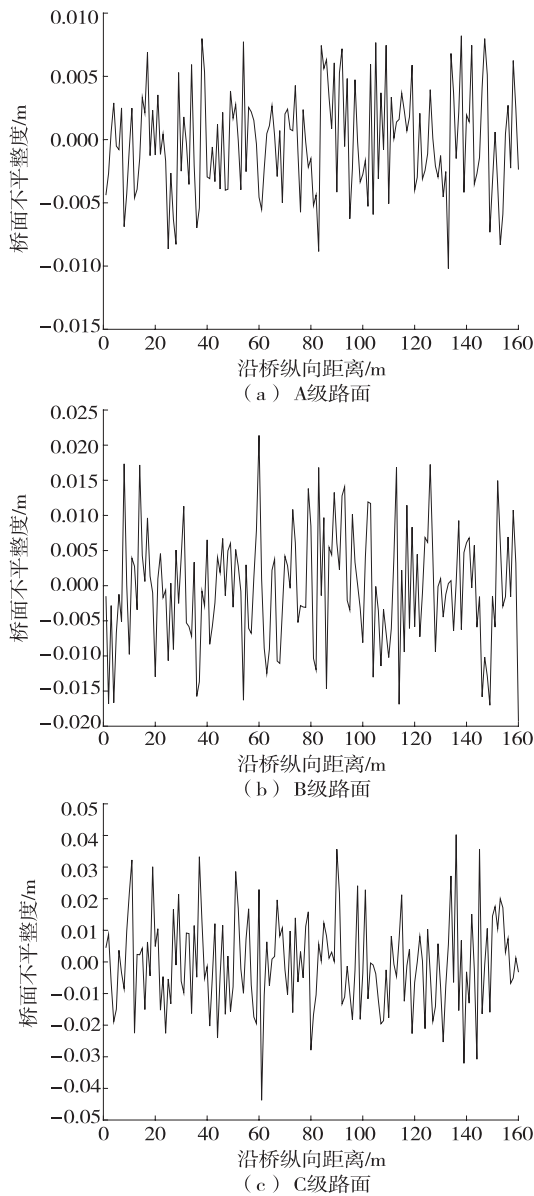


图 4 不同路面等级的不平度样本

表 2 GB/T 7031—2005 中的路面分级

道路 等级	不平度度/($\times 10^{-6} \text{ m}^3$)			
	$G_d(n_0)$		$G_v(n)$	
	下限	几何平均	下限	几何平均
A	—	16	32	6.3
B	32	64	128	25.3
C	128	256	512	101.1
D	512	1 024	2 048	404.3
E	2 048	4 096	8 129	1 617.0
F	8 192	16 384	32 768	6 468.1
G	32 768	65 536	131 072	25 872.6
H	131 072	262 144	—	103 490.3

2.4 桥面状况

桥面状况是影响桥梁与车辆之间动力相互作用的重要因素。为检测实测桥面状况对桥梁动力响应的影响,测试桥面状况和平整度,结果见图 5、图 6。



图 5 实测桥面状况

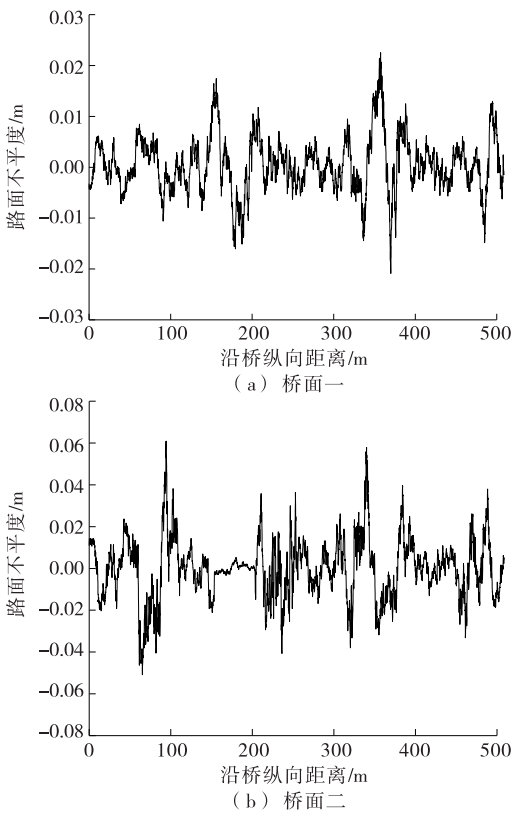


图 6 实测桥面不平度

2.5 桥梁动力响应

车辆与桥梁振动的主要激励源之一是桥面不平整。由于车速变化会引起作用在桥上的荷载频率发生改变,在某一车速下其频率与桥梁固有频率一致或接近时,将导致车、桥共振。根据上述 A 级路面和实测桥面一、实测桥面二的状况,采用一辆重 12 t

的车辆荷载,车速分别取 80、100、120 km/h,通过 MATLAB 车—桥耦合计算程序,取中跨跨中截面进行动力响应分析。不同车速作用下桥梁中跨跨中位移见图 7~9,竖向加速度见图 10~12。

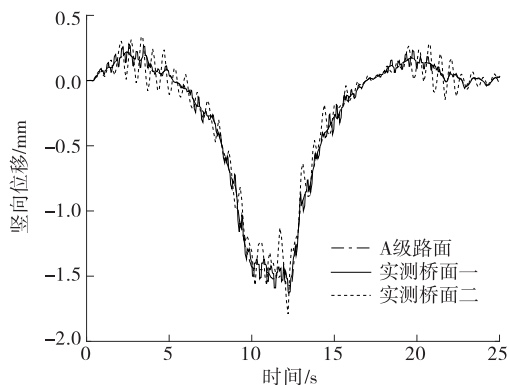


图 7 车速 80 km/h 时跨中截面竖向位移

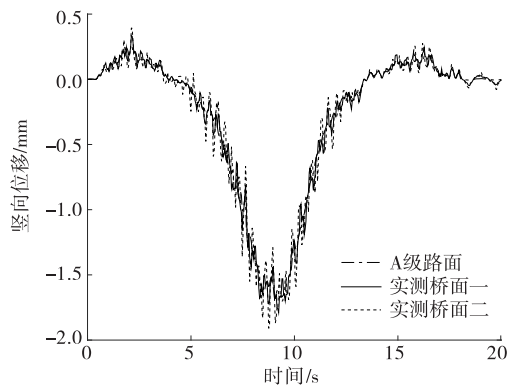


图 8 车速 100 km/h 时跨中截面竖向位移

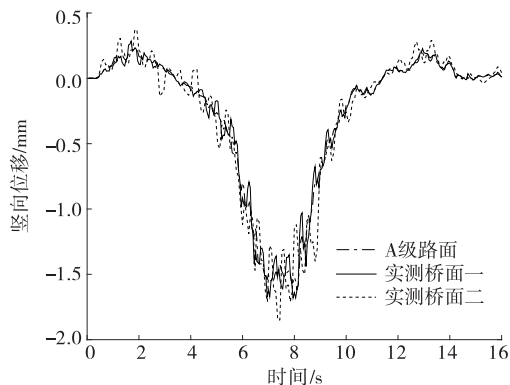


图 9 车速 120 km/h 时跨中截面竖向位移

由图 7~12 可知:该桥中跨跨中位移和竖向加速度均随着车速的增加先增大后减小。

3 冲击系数分析

冲击系数的表达式如下:

$$\mu = \frac{R_d(x) - R_s(x)}{R_s(x)} \quad (11)$$

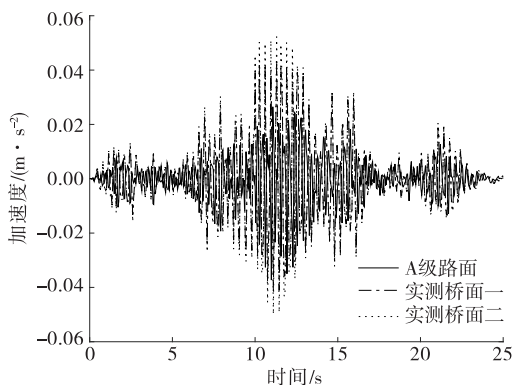


图 10 车速 80 km/h 时跨中截面竖向加速度

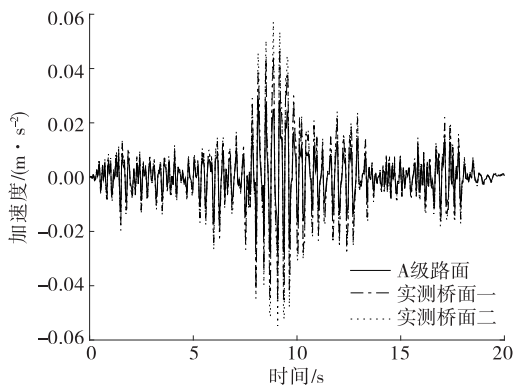


图 11 车速 100 km/h 时跨中截面竖向加速度

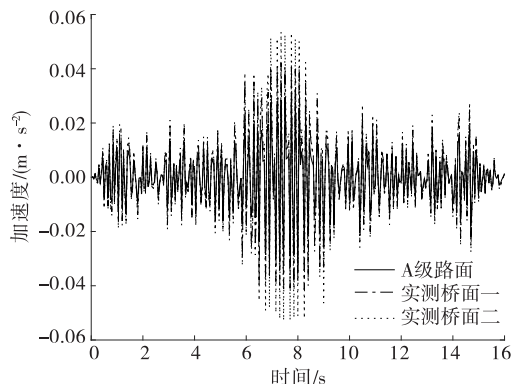


图 12 车速 120 km/h 时跨中截面竖向加速度

式中: $R_s(x)$ 、 $R_d(x)$ 分别为桥梁动态效应的最大值和静态效应的最大值。

3.1 美国桥梁规范

1977 年美国公路桥梁设计规范中,冲击系数按式(12)计算。而 1998 年规范中,计算桥面接缝在极限状态下时, μ 取 0.75;构件处于断裂或疲劳状态时, μ 取 0.15;结构处于其他情况时, μ 取 0.33。

$$\mu = \frac{15.24}{L + 38.10} \quad (12)$$

3.2 加拿大桥梁规范

1991 年加拿大公路桥梁规范中,冲击系数取值

仅与车轴数相关,单轴车辆 μ 取 0.4,双轴车辆 μ 取 0.3,车轴数超过 2 时 μ 取 0.25。

3.3 中国桥梁规范

JTG D60—2004《公路桥梁设计通用规范》中,冲击系数取值仅与结构基频相关, $f < 1.5$ Hz 时, $\mu = 0.05$; $1.5 \text{ Hz} < f < 14 \text{ Hz}$ 时, $\mu = 0.176 7 \ln f - 0.015 7$; $f > 14 \text{ Hz}$ 时, $\mu = 0.45$ 。

由于各国规范采用不同方法对冲击系数进行计算,对国内规范和国外几种常用规范得出的冲击系数进行对比分析很有必要。

3.4 车速变化对冲击系数的影响

在实测桥面一下分析不同车速对桥梁冲击系数的影响,结果见表 3。

表 3 不同车速下桥梁中跨跨中的冲击系数

车速/ (km · h ⁻¹)	振动响应/mm		冲击系数
	动位移	静位移	
60	1.581	1.479	0.069
70	1.593	1.479	0.077
80	1.608	1.479	0.087
90	1.654	1.479	0.118
100	1.643	1.479	0.110
110	1.632	1.479	0.103
120	1.611	1.479	0.089

根据不同桥面平整度,按各国规范计算不同车速下该桥中跨跨中的冲击系数,结果见图 13。

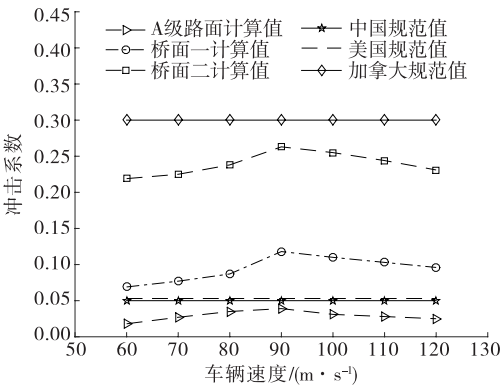


图 13 不同车速下各国规范桥梁中跨跨中冲击系数对比

由图 13 可知:在实测桥面一下,随着车速的增大,中跨跨中截面的最大动挠度先增加,达到某一最大值后其值降低。最大值的出现可能是由于车辆以某一速度在桥上行驶时,其振动频率与桥梁结构的自振频率接近或一致。如实测桥面一下,车辆以 90 km/h 的速度通过桥梁时,桥梁跨中截面的最大动

位移为 1.654 mm,对应的冲击系数为 0.118。A 级桥面下中跨跨中截面的冲击系数随车速增加的幅度比实测桥面一、实测桥面二的小。

3.5 桥面平整度对冲击系数的影响

在车速 80 km/h 下分析桥面平整度对桥梁冲击系数的影响,结果见表 4。各国规范冲击系数计算值与不同车速时不同桥面平整度下中跨跨中冲击系数对比见图 14。

表 4 不同桥面平整度下桥梁跨中冲击系数

桥面平整度	动位移/mm	静位移/mm	冲击系数
A 级	1.532	1.479	0.035
实测桥面一	1.608	1.479	0.087
实测桥面二	1.831	1.479	0.238

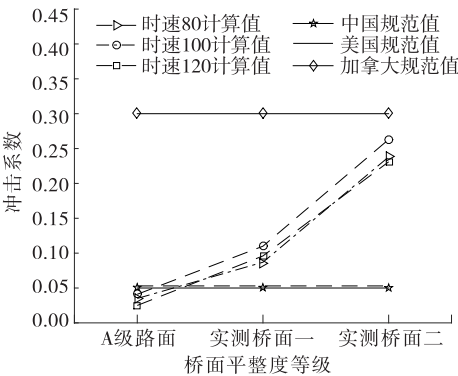


图 14 不同桥面平整度下各国规范桥梁冲击系数比较

由表 4 和图 14 可知:在实测桥面二平整度下,有最大竖向位移 $y = 1.831 \text{ mm}$ 。桥面平整度越差,桥梁中跨跨中截面的振动响应与冲击系数越大,其中实测桥面一、实测桥面二平整度下的冲击系数分别为 A 级桥面平整度下的 2.5 和 6.8 倍。桥梁运营服役过程中,为尽量减少冲击作用的影响,应密切关注桥面状况,随时采取维护与保养措施。

4 结论

- (1) 桥面平整度对车—桥耦合振动及冲击系数有很大影响。车速保持恒定时,桥面行驶条件越不好,跨中截面的冲击系数、竖向挠度和加速度越大,导致桥面等级退化。对桥面进行保养和维护,可大大减轻较差桥面状况对桥梁结构的冲击作用。
- (2) 车速是影响桥梁中跨跨中截面动力响应和冲击系数的主要因素,随着车速的增大,中跨跨中截面的最大动挠度和冲击系数均先增加后减小。
- (3) 根据不同国家规范计算的冲击系数理论值

有差别,其中美国规范理论值略大于中国规范理论值。当路面平整度较差时,冲击系数计算值大于中国和美国规范理论值。

参考文献:

- [1] Yin X F, Cai C S, Fang Z, et al. Bridge vibration under vehicular loads-tire patch contact versus point contact [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2010, 10(3).
- [2] Chen S R, Cai C S. Accident assessment of vehicles on long-span bridges in windy environments [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92.
- [3] Christoph Czaderski, Masoud Motavalli. 40-year-old full-scale CFRP plates anchored using gradient method [J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38.

- [4] 殷新锋, 刘扬, 彭晖, 等. 路面破损的桥梁在车辆作用下冲击系数分析 [J]. 振动工程学报, 2013, 26(4).
- [5] Yin Xinfeng, Fang Zhi, Cai C S. Lateral vibration of high-pier bridges under moving vehicular loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(3).
- [6] 殷新锋, 丰锦铭, 刘扬. 考虑桥面等级退化影响的风—车流—桥梁耦合振动分析 [J]. 工程力学, 2016, 33(3).
- [7] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). LRFD bridge design specifications [S].
- [8] Association of State Highway and Transportation of Officials (AASHTO). Standard specifications for highway bridges [S].
- [9] CSA International. Canadian highway bridge design code [S].

收稿日期: 2019-02-25

(上接第 91 页)

张拉切割法,使旧吊杆轴力呈线性减小的同时,也使吊杆位置处的桥梁标高变化呈规律性上下波动,虽然张拉比例的控制精度不够精确,但基本符合工程要求,可应用于系杆拱桥的换索工程。

参考文献:

- [1] 赵洋. 系杆拱桥吊杆更换研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [2] 王欣, 虞根森, 俞峰. 拱桥吊杆更换的二次索力等效置

换 [J]. 中国建材科技, 2011, 20(5).

- [3] 任新伟, 陈刚. 由基频计算拉索拉力的实用公式 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(11).
- [4] 李新平. 空间系杆拱桥吊杆张拉控制分析 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2004, 32(7).
- [5] 聂磊. 危旧吊杆拱桥加固改造关键技术研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2010.
- [6] 王春龙, 饶瑞. 系杆拱桥吊杆更换的索力优化分析 [J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2015(6).

收稿日期: 2019-03-07

(上接第 126 页)

桥破损、开裂、刮伤的斜拉索 PE 套管; 加强运营期观测, 定期进行健康检测与评定。

参考文献:

- [1] 胡剑, 张少勇. 大跨度三塔斜拉桥技术状态检测与评估 [J]. 公路, 2018(7).
- [2] 刘金平. 独塔混合梁斜拉桥承载力的检测与评定 [J]. 世界桥梁, 2011(4).
- [3] 姚蓓, 张启伟. 钢斜拉桥运营期耐久性与易损性监测 [J]. 中外公路, 2016, 36(1).
- [4] 梅霄云. 在役带协作跨预应力混凝土斜拉桥承载力分析及寿命预测 [D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [5] 李鸥, 侍刚, 王波, 等. 运营期桥梁斜拉索的技术状况检测 [J]. 世界桥梁, 2017(4).
- [6] 刘瑞军. 营运斜拉桥检测与安全评价 [D]. 石家庄: 石家

庄铁道大学, 2015.

- [7] 张泽民. 大型城市桥梁检测评估方法及应用分析 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [8] 何宇. 既有斜拉桥结构的检测及承载能力评定 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [9] JTG/T J21-2011, 公路桥梁承载力检测评定规程 [S].
- [10] JTG 3362-2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].
- [11] JTG/T D65-01-2007, 公路斜拉桥设计细则 [S].
- [12] 伍静, 单积明, 向勇. 重庆东水门公轨两用斜拉桥荷载试验研究 [J]. 公路与汽运, 2016(1).
- [13] 孙璇, 刘玉擎, 江祥林. 斜拉桥混合梁结合段受力性能研究 [A]. 中国公路学会桥梁和结构工程分会 2013 年年会暨全国桥梁学术会议 [C]. 2013.

收稿日期: 2019-07-10